

祝青林,王丽娜,徐梅,等,2017. 1971—2015 年大连地区低风速气象特征分析[J]. 气象,43(12):1578-1583.

## 1971—2015 年大连地区低风速气象特征分析\*

祝青林<sup>1</sup> 王丽娜<sup>2</sup> 徐梅<sup>3</sup> 牛桂萍<sup>4</sup>

1 大连市旅顺口区气象局,大连 116041

2 大连市气象服务中心,大连 116001

3 天津市气象局,天津 300060

4 大连瓦房店市气象局,瓦房店 116300

**提 要:** 利用 1971—2015 年大连地区 7 个国家气象站的气象资料,统计低风速条件下的累积频率、日变化、月变化和持续性等特征,分析低风速频率空间分布和年际变化特征。结果表明:(1)大连地区低风速频率较低,平均约 20%,地区间差异显著,近海区域长海站最低,为 8%,内陆的普兰店地区较高,达 32%。(2)近 45 年,低风速频率呈增加趋势,大连、长海和普兰店站增加趋势显著,特别是近 10 年增幅更大。(3)大连站低风速频率具有显著的日变化,主要表现为白天偏低、中午时段最低,夜间高,半夜达到最高。(4)3—7 月,大连地区低风速频率低;9 月至次年 2 月较高,最大值出现在 9 月。(5)低风速持续时间长海站最长,持续 10 h 以上低风速频率达到 27%,持续 20 h 以上接近 9%,大连站低风速持续时长最短,持续 4 h 以下的占 85%。

**关键词:** 低风速,风速频率,Mann-Kendall 趋势分析,气象特征

**中图分类号:** P466

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.014

### Characteristics of Low Wind-Speed in Dalian from 1971 to 2015

ZHU Qinglin<sup>1</sup> WANG Lina<sup>2</sup> XU Mei<sup>3</sup> NIU Guiping<sup>4</sup>

1 Lüshunkou Meteorological Office of Dalian, Dalian 116041

2 Dalian Weather Service Centre, Dalian 110016

3 Tianjin Meteorological Service, Tianjin 300062

4 Wafangdian Weather Office of Dalian, Wafangdian 116300

**Abstract:** Based on the daily observation data of seven stations in Dalian from 1971 to 2015, the cumulative frequency the diurnal and monthly distributions of low wind-speed are analyzed. The trend of annual percentage of low wind-speed are also studied. The results show that: (1) The frequency of low wind speed conditions in Dalian is about 20% in the recent 45 years, with the lowest (8%) at Changhai, and the highest (35%) at Pulandian. (2) The frequency of low wind speed has an increasing trend, and there are significant increasing trends at Dalian, Pulandian and Changhai, especially in the past ten years. (3) The frequency of low wind speed conditions has significant diurnal changes, which is high over the night and low during the daytime. (4) From March to July, the frequency of low wind-speed is low and from September to February it is higher with the maximum value seen in Dalian in September. (5) Changhai is the station with the longest duration of low wind-speed. The 27% low wind-speed condition can last at least 10 h and the 9% low wind-speed conditions can last at least 20 h at Changhai Station. Dalian Station is the station with the shortest duration, more than 85% low wind-speed condition in Dalian Station can last 4 h or less.

**Key words:** low wind-speed, wind speed frequency, Mann-Kendall trend test, meteorological feature

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206024)和环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201502)共同资助

2016 年 8 月 18 日收稿; 2017 年 8 月 15 日收修定稿

第一作者:祝青林,主要从事气候变化及气象服务研究. Email:zql\_apple@163.com

## 引 言

地面低风速气象条件对城市大气环境质量具有重要意义(李小飞等,2012;张爱英等,2009)。近 20 年随着工业高速发展,污染物排放增加,城市大气高污染天气频发,风速条件成为影响大气污染指数最关键的指标之一(蒋维楣等,2004;杜传耀等,2015)。低风速直接影响大气污染物的扩散稀释能力。低风速气象条件下,大气扩散能力弱,容易造成污染物累积,形成污染天气(Smith,1992;吴萍等,2016)。刘香娥等(2016)、陈镭等(2016)分别研究了北京、上海等地的重污染过程的气象条件,结果表明低风速条件出现的静稳天气非常有利于污染天气的出现和维持。因此对低风速气象条件研究有重要意义。

对地面风速的气候特性和演变趋势已有大量的研究成果(Anfossi et al,2005)。王遵娅等(2004)研究中国 1951—2000 年平均风速的演变趋势,结果表明全国大部分地区风速都有减小趋势,冬、春季减小趋势最显著。赵宗慈等(2016)研究近 50 年中国风速减小的特征和可能原因,结果表明 1961—2014 年近地面风速减小,大约每 10 年减小  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而且四个季节风速都在减小。江滢等(2007)研究表明平均风速减小主要由于日平均风速  $\geq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的日数减少造成的。国内外针对低风速气象特征的研究较少,Smith(1992)最早对低风速气象条件进行系统研究,分析了低风速出现频率的季节变化特性和持续性等。Deaves and Lines(1998)研究英国内陆地区小于  $2.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的低风速,结果显示低风速频率在  $9.2\% \sim 29.7\%$ 。郭梦婷等(2016)研究表明近 30 年间全国低风速频率约为  $40\%$ ,全国低风速频率的总体空间分布是南方高、北方低,内陆高、沿海低的特点。目前对低风速条件的研究仍相对薄弱,尤其对近 10 年风速和空气污染指数有显著变化的情况下,低风速气象特征的分析尤为重要。

近 50 年大连地区观测的平均风速减小趋势显著(郭军等,2015),在此背景下地面低风速的气候特点和趋势值得关注。本文根据近 45 年(1971—2015 年)气象资料,系统分析了大连地区低风速条件的基本特征和演变趋势,可为当地环境污染研究提供参考。

## 1 资料来源及处理方法

### 1.1 资料来源

本文资料包括大连地区 1971—2015 年 7 个国家观测站每日 02、08、14 和 20 时 4 个时次风速观测资料,2003—2015 年 7 个测站每日 24 个时次风速观测资料(2003 年开始有 24 h 风速观测)。另外还选取大连站 1954—1970 年 02、08、14 和 20 时 4 个时次风速观测资料。本文用标准正态同质性检验方法检验了资料的均一性,选择邻近相关性高、未发生站点迁移的站点作为参考站,用被检站与参照站的比值作为被检序列来检验,待检序列的建立及检验步骤参考刘小宁(2000)的方法。检验结果显示旅顺站在 1978 年、庄河站在 1975 年检验统计量  $T_0 > T_{95}$ ,检验结果为非均一,两个站点分别在 1979 年 1 月和 1976 年 1 月进行了迁站,本文采用风速序列一致性修正方法做了修订(张洋,2011),通过了  $T_{95}$  的检验。本文选取的测站分布情况见图 1。

### 1.2 低风速标准

目前,低风速标准的定义还没有统一标准。多数研究者采用小于某一风速值作为判定标准。例如:Lines et al(1997)根据定量风险评价采用的最小值,选取小于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  作为低风速的标准;Gadian et al(2004)将  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速作为空气污染扩散研究中的重要风速阈值;郭梦婷等(2016)选取小于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  作为低风速状态的标准。唐敬等(2011)以风速小于  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  来定义低风速条件。在很多研究中风速测量值为整数,小于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速代表了 0 和  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (郭梦婷等,2016),与小于

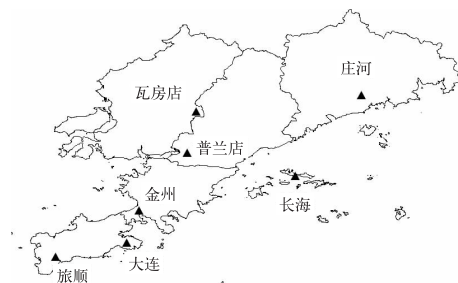


图 1 研究区和观测站分布  
Fig. 1 Study area and locations of weather stations in Dalian

1.5 m·s<sup>-1</sup> 标准结果一致。由于国家气象站日 4 时次风速数据集中,1971—1992 年采用整数记录,之后采用一位小数点记录,小于 1.5 m·s<sup>-1</sup> 标准能保证数据的延续性和可比性,因此本文选择小于 1.5 m·s<sup>-1</sup> 指标作为定义低风速标准。

### 1.3 统计及趋势分析方法

本文统计的风速累积频率采用 1971—2015 年逐日 4 个时次的风速 <0.5、<1.5、<2.5、<3.5、<4.5、<5.5、<6.5、<7.5 和 <8.5 m·s<sup>-1</sup> 以及全部风速的出现次数与总观测次数比值计算,分别代表了 0、1、…、9 m·s<sup>-1</sup> 的累积频率。低风速频率日变化通过统计 2003—2015 年逐日各整点(01、02、03、…、24 时)低风速出现次数占该时次总观测次数的比例计算;低风速频率月变化通过统计 1971—2015 年各月的低风速出现次数占月总观测次数的比值计算;低风速持续性通过 2003—2015 年 24 个时次数据计算,分别统计低风速持续 01、02、03、…、24 时的频率。Mann-Kendall(M-K)趋势分析法是国际上较适合水文气象要素趋势分析的方法,本文

利用 M-K 趋势分析法计算和检验趋势变化(Mann, 1945; Kendall, 1975; 刘昌明和郑红星, 2003; 祝青林等, 2005)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 低风速演变特征

1971—2015 年大连地区低风速频率有增加趋势,其中大连、长海和普兰店站增加趋势显著, M-K 趋势值分别达到 3.33、4.81 和 2.48(表 1),通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验。特别是近 10 年增幅更大,近 10 年地区平均频率比前 10 年增加 77%。

图 2 为 1971—2015 年大连、长海、普兰店和庄河站低风速频率及平均风速,可以看出,1971—2015 年,大连站和长海站低风速频率有明显的增加趋势,与此相对应的是平均风速呈减小趋势,两者具有明显反相关性。与大连、长海相比,其他地区低风速频率高,低风速频率均有增加趋势,但均未通过显著性检验。

表 1 1971—2015 年大连低风速频率趋势 M-K 值

Table 1 The M-K values of percentage of low wind speed conditions in Dalian

测站	大连	长海	庄河	旅顺	普兰店	金州	瓦房店	平均
M-K 值	3.33	4.81	0.67	1.35	2.48	1.33	0.96	1.19

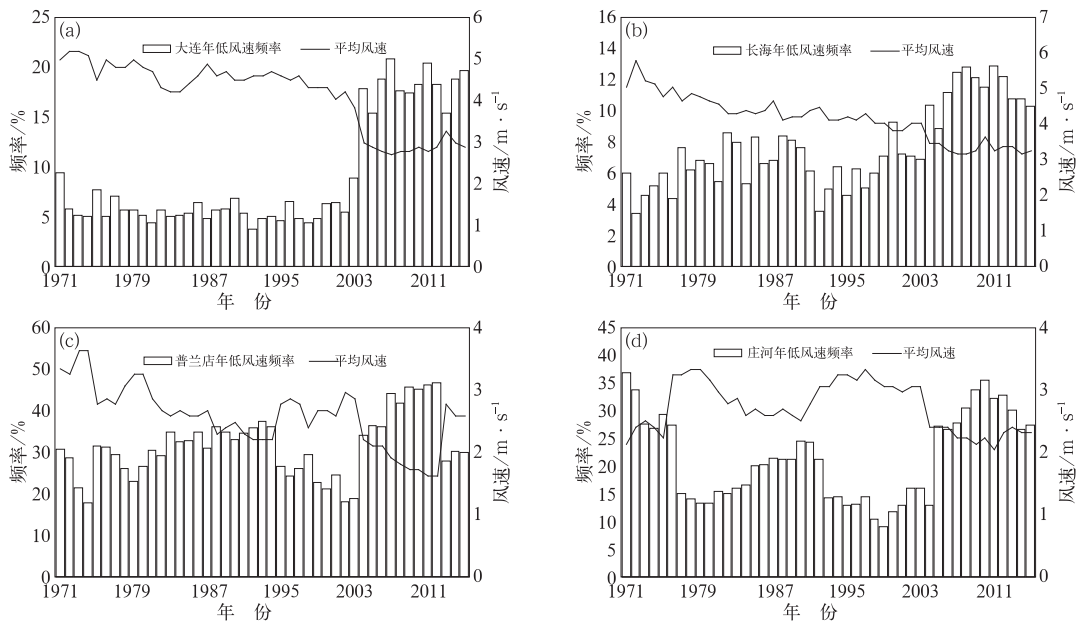


图 2 1971—2015 年大连(a)、长海(b)、普兰店(c)和庄河(d)站低风速频率级及平均风速

Fig. 2 Percentage of low wind speed conditions and annual wind speed in Dalian (a), Changhai (b), Pulandian (c), and Zhuanghe (d) Stations from 1971 to 2015

### 2.2 风速累积频率

表 2 为大连各地低风速累积频率表,可以看出大连地区低风速频率有显著的地区间差异,其中大连、长海最低,在 8%~9%,普兰店最高,约为 32%,其他地区在 8%~26%,均小于全国平均频率(约 40%)。图 3 为风速累积频率曲线。图中  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  对应的累积频率表示小于  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速的累积

频率,即低风速出现频率, $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  对应的累积频率表示小于  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速的累积频率,以此类推。结果表明,普兰店风速累积频率在各风速等级下均最大,大连、长海站最小,其他各站基本排序与低风速一致。但庄河站在风速  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时排第四位,在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时已经并列第一位了,说明普兰店低风速频率高出庄河 10%,但庄河站  $1.5 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速占比显著高于普兰店站。

表 2 大连各地低风速累积频率表

Table 2 Cumulative percentage of low wind-speed conditions in Dalian

测站	大连	旅顺	金州	长海	普兰店	瓦房店	庄河	平均
累积频率/%	9	18	23	8	32	26	23	20

从站点分布看,低风速频率南部低于北部,海边低于内陆地区。从图 2 还可看出,靠近内陆地区的普兰店、庄河和瓦房店 90% 以上的风速小于  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 而靠近海边的大连、长海、旅顺大于  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速频率超过 20%。

图 4 将 1954—2015 年大连站风速频率划分成

4 个阶段,分别为 1954—1967 年为第一时期,1968—1983 年为第二时期,1984—1999 年为第三时期,2000—2015 年为第四时期。可以看出,大连站风速累积频率曲线发生了显著变化,在接近  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速附近,从第一至第四时期,风速频率呈逐渐递减趋势,在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上风速累积频率,风速频率出现递增趋势。在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的累积风速频率上,2000—2015 年明显高于前 3 个时期,说明近 15 年低风速频率有增大趋势。

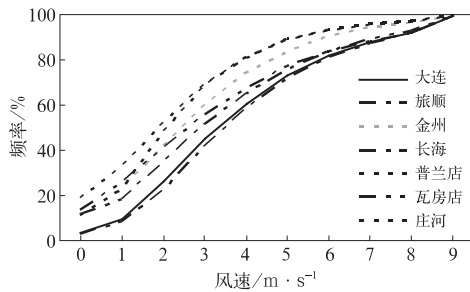


图 3 1971—2015 年大连地区风速累积频率曲线

Fig. 3 Cumulative percentage of wind speed conditions in Dalian from 1971 to 2015

### 2.3 日变化特征

图 5 为大连站低风速频率日变化曲线。可以看出,大连站平均低风速频率有显著的日变化特征,01—06 时,大连站低风速频率维持在 20% 左右,07 时开始快速下降,在 12—15 时降至最低,在 3% 以下,最低出现在 14 时,达到 1.9%。16 时开始低风速频率快速增大,21—24 时达到最高水平,接近 20%。

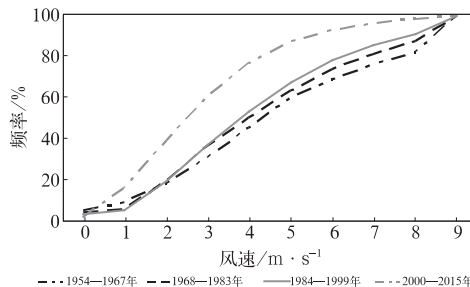


图 4 1954—2015 年大连站 4 个时期风速累积频率曲线

Fig. 4 Cumulative percentage of wind speed conditions of four different periods at Dalian Station from 1954 to 2015

图 5 将 1994 年以来大连站的数据分成前后两段,1994—2003 年和 2004—2015 年平均低风速频率表现出相同的日变化趋势,波峰、波谷以及变化大体一致。两者的差异表现为 2004—2015 年低风速频率整体大于 1994—2003 年平均值,特别是夜间显著偏小,20 时至次日 20 时,低风速频率最高时为后者的 3 倍左右。从风速频率变化趋势看,2004—2015 年日变化更加剧烈,从 06 时开始快速下降,1994—2013 年在 08 时开始下降,降低趋势更平缓。同样在傍晚低风速频率开始升高时,两者开始时间接近,均在 16 时左右,但 1994—2003 年 20 时左右即曲线开始变得平缓,而 2004—2015 年曲线则出现

在 21 时。

### 2.4 月际变化特征

大连地区全年低风速的出现频率整体较低,但季节性明显,在秋、冬季的月份较为显著偏大。图 6 为大连各地区低风速频率月变化。从地区平均看,3—7 月,低风速频率较低,在 13%~18%,最低值出现在 4 月,为 13%;9 月至次年 2 月维持在较高水平,在 20%~27%,最大值出现在 9 月,达到 27%,可以看出大连秋、冬季,低风速频率偏高,大气污染扩散能力偏弱。各地区月分布可以分为两大类,一是长海和大连,两地在 11 月至次年 4 月较为稳定,低风速频率低,在 10% 以下,长海在夏季频率最高,在 13% 左右,大连站 6—10 月较高。其他地区属于第二类,风速频率较高,月际变化趋势基本一致,表现为:4—7 月处于低值区间,8 月开始迅速增大,9 月达峰值,10 月至次年 1 月维持较高水平,2 月迅速下降。

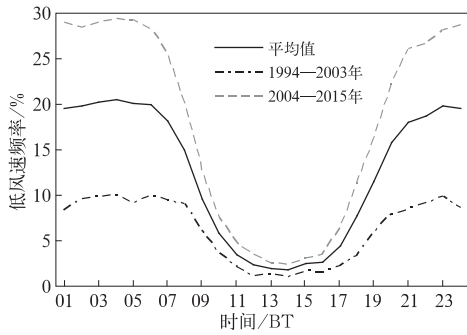


图 5 大连站低风速频率日变化曲线  
Fig. 5 Diurnal changes of percentage of low wind-speed conditions in Dalian Station

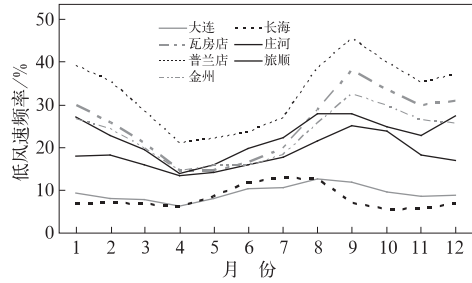


图 6 1971—2015 年大连地区低风速频率月变化曲线  
Fig. 6 Monthly changes of percentage of low wind-speed conditions in Dalian from 1971 to 2015

### 2.5 低风速持续性

图 7 为采用 2003—2015 年每日 24 h 数据统计的低风速持续时间概率曲线。7 个站点中大连站低风速持续时长最短,低风速持续 4 h 以下的占到 85%。长海低风速持续时长最长,持续 10 h 以上的低风速达到 27%,持续 20 h 以上低风速接近 9%。旅顺、金州和瓦房店三地的低风速持续性比较接近,持续时间均处于大连站和长海站之间。其中,旅顺最低,金州居中,瓦房店相对较高。

## 3 结论与讨论

本文分析了大连地区低风速出现频率及日、月、年变化特征,结果如下。

(1) 近 45 年,大连地区平均低风速出现频率约为 20%。北部内陆地区与沿海测站低风速频率有

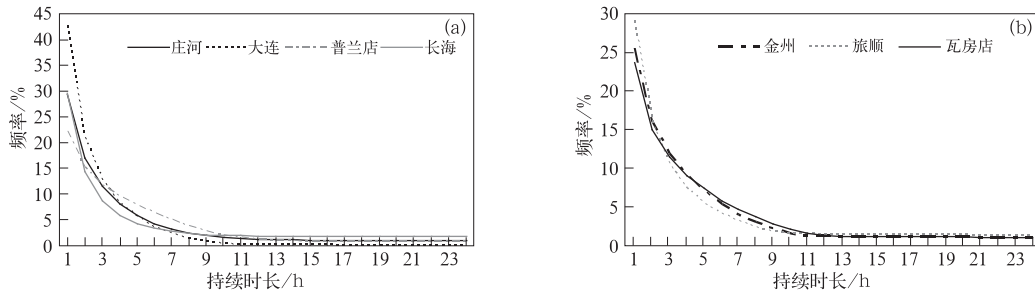


图 7 大连地区低风速持续时间曲线  
(a) 庄河、大连、普兰店、长海, (b) 金州、旅顺、瓦房店  
Fig. 7 Percentage of low wind-speed sustained for different time periods in Dalian  
(a) Zhuanghe, Dalian, Pulandian and Changhai Stations,  
(b) Jinzhou, Lüshun and Wafangdian Stations

明显差异,其中,海岛站长海最低,约为 8%;普兰店最高,达到 32%;其他地区在 18%~26%。

(2) 大连站平均低风速频率具有显著的日变化,主要表现为白天偏低、中午时段最低,夜间高,半夜达到最高。01—06 时,大连站低风速频率维持在 20%左右,07 时开始快速下降,在 12—15 时降至最低,在 3%以下,最低出现在 14 时,达到 1.9%。16 时开始低风速频率快速增大,21—24 时达到最高水平,接近 20%。

(3) 3—7 月,大连地区低风速频率较低,在 13%~18%,最低值出现在 4 月,为 13%;9 月至次年 2 月维持在较高水平,在 20%~27%,最大值出现在 9 月,达到 27%。

(4) 大连市区低风速持续时长最短,持续 4 h 以下的占到 85%;长海低风速持续时长最长,持续 10 h 以上风速的频率达到 27%,持续 20 h 以上风速接近 9%。

(5) 1971—2015 年,大连、长海和普兰店低风速增加趋势显著,其他地区也呈增加趋势。

大连地区低风速频率具有显著的日、月、年变化特征,导致这种变化的原因比较复杂,全年平均风速降低与年低风速出现频率的增加有直接的关系,而导致低风速出现频率迅速增加和其日、月变化的气候背景需要深入分析。另外,在低风速与污染天气的相关关系上,值得进一步深入研究。

## 参考文献

- 陈镭,马井会,耿福海,等,2016. 上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析[J]. 气象,42(2):203-212.
- 杜传耀,于丽萍,王緌,等,2015. 对雾-霾过程的综合探测[J]. 气象,41(12):1525-1530.
- 郭军,曹经福,杨艳娟,2015. 1971—2012 年环渤海沿海地区风速变化及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报,31(4):82-88.
- 郭梦婷,蔡旭晖,宋宇,2016. 全国低风速气象特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),52(2):219-226.
- 蒋维楣,孙鉴泞,曹文俊,2004. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社:21-155.
- 江滢,罗勇,赵宗慈,等,2007. 近 50 年中国风速变化及原因分析[C]//2017 年中国气象学会年会论文集. 广州:中国气象学会:80-89.
- 李小飞,张明军,王圣杰,等,2012. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学,33(6):1936-1943.
- 刘昌明,郑红星,2003. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. 自然资源学报,18(2):129-135.
- 刘香娥,何晖,贾星灿,等,2016. 北京一次污染天气过程特征的数值模拟[J]. 气象,42(9):1096-1104.
- 刘小宁,2000. 我国 40 年年平均风速的均一性检验[J]. 应用气象学报,11(1):27-34.
- 唐敬,蔡旭晖,康凌,等,2011. 复杂地形低风速气象特征分析[J]. 气象科学,31(4):542-547.
- 王遵娅,丁一汇,何金海,等,2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,62(2):228-236.
- 吴萍,丁一汇,柳艳菊,等,2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. 气象学报,74(3):352-366.
- 张爱英,任国玉,郭军,等,2009. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析[J]. 高原气象,28(3):680-687.
- 张洋,2011. 风速系列一致性修正方法研究[J]. 电力勘测设计,(3):19-22.
- 赵宗慈,罗勇,江滢,等,2016. 近 50 年中国风速减小的可能原因[J]. 气象科技进展,6(3):106-109.
- 祝青林,张留柱,于贵瑞,等,2005. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征[J]. 自然资源学报,20(4):477-482.
- Anfossi D, Oetl D, Degrazia G, et al, 2005. An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions[J]. Bound-Layer Meteorol, 114(1):179-203.
- Deaves D M, Lines I G, 1998. The nature and frequency of low wind speed conditions[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 73(1):1-29.
- Gadian A, Dewsbury J, Featherstone F, et al, 2004. Directional persistence of low wind speed observations[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 92(12):1061-1074.
- Kendall M. G, 1975. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin.
- Lines I G, Deaves D M, Atkins W S, 1997. Practical modelling of gas dispersion in low wind speed conditions, for application in risk assessment[J]. J Hazard Mater, 54(3):201-226.
- Mann H B, 1945. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 13(3):245-259.
- Smith F B, 1992. Low wind-speed meteorology[J]. Meteor Mag, 121:141-151.